

<論 文>

# 點熔接材의 破壞舉動과 應力分布

宋 森 弘\* · 金 富 東\*\*

(1984年 1月 30日 接受)

## A Study on Behavior of Fracture and Stress Distribution in Spot Welds

Sam Hong Song and Boo Dong Kim

### Abstract

Having found by means of a tension-shear test an optimal spot welding condition under which the maximum weld strength is to be brought forth, this study made an examination of behavior of fracture concerned with behavior of stress distribution, observed around the nugget periphery of the specimens prepared under the optimal conditions, with one point spot welded mild steel sheets.

The resultant findings are as follows:

(1) There remarkably exists an optimal spot welding condition to indicate the maximum weld strength, and fracture of the specimens spot welded under that condition occurs outside the nugget boundary.

(2) An experiment on the basis of a photoelastic model reveals that the maximum stress is distributed along the center line of the steel plate width but occurs on the region corresponding to heat affected zone of spot welds.

(3) Heat affected zone of spot welds consists of coarse grains with considerably low micro Vickers hardness value and of fine grains of high micro Vickers hardness value, and in this unbalanced structure weak region are represented in coarse grain region, where fracture is initiated and continues its propagation.

### 1. 序 論

點熔接한 材料의 너깃周圍에서 發生·傳播하는 破壞形態에 關連된 問題는 현재 自動車·航空機 等 各種 交通機關의 信賴性이라는 立場에 不때 매우 重要하다.

Begeman<sup>(1)</sup>, Rudy<sup>(2)</sup>, Pollard<sup>(3)</sup> 等<sup>(4-6)</sup>은 1點 點熔接 이음材에 靜의 引張荷重을 가했을 때 너깃周圍에 나타나는 破壞形態는 테어(tear), 버튼(button) 및 剪

斷(shear) 破壞로 나눌 수 있다고 하였다.

여기서 테어破壞<sup>(3,4)</sup>란 너깃을 形成하는 境界를 中心으로 그 바깥에서 破壞가 일어나는 境遇를 말하고, 버튼破壞<sup>(5,6)</sup>는 境界를 중심으로 너깃 内部에 속하는 너깃틀레 부분에서 發生하는 境遇이고, 剪斷破壞<sup>(3-6)</sup>는 너깃內의 接合面에서 破壞가 일어나는 現象을 말한다.

이와 같이 破壞形態가 各己 다르게 나타나는 原因에 대해서는 研究者에 따라 그 見解가 다르나, 그것을 종합해 보면, (1) 點熔接條件<sup>(1-4)</sup>, (2) 너깃內에 存在하는 不純物<sup>(5)</sup> (3) 너깃周圍의 金屬組織學的으로 脆弱한 局部場所<sup>(3,6-8)</sup> (4) 너깃境界 自體가 갖는 노치效果<sup>(9)</sup> 等으로 集약할 수 있다.

\*正會員, 高麗大學校 工科學 機械工學科

\*\*正會員, 慶熙大學校 大學院, 現 京畿工業開放大學 機械設計學科

그런데, 상술한 종래의 研究 中에 특히 熔接條件의 變化에 따른 破壞舉動과 應力分布舉動을 관련시켜 研究한 資料는 거의 찾아볼 수 없다. 만약 點熔接條件이 變化하면 熔接強度 및 破壞舉動도 變化할 것이 예상 된다.

왜냐하면 各 點熔接試驗片에 引張荷重을 가하게 되면 너깃周圍의 應力分布舉動들이 대단히 복잡하게 일어나고, 어떤 應力水準에 도달하면 어느 特定한 場所에서 破壞가 發生하리라고 생각되기 때문이다. 따라서 本 研究에서는 以上과 같은 점을 고려하고, 引張試驗을 통해 最大熔接強度를 나타내는 最適熔接條件을 구한 다음, 最適條件下에서 薄鋼板을 1點 點熔接한 材料의 너깃周圍에 觀察되는 破壞舉動을 光彈性 應力分布舉動과 관련시켜 考察하였다.

2. 實驗方法

點熔接試驗片의 素材는 冷間延延된 軟鋼板 SCP 1 (KS D 3512, 引張強度 28kgf/mm<sup>2</sup> 以上)로서, 機械的 性質 및 化學成分을 Table 1에 表示하였다. 試驗片 上下 各 板의 두께는 共히 t=1mm로 하였고, 너깃 지름은 d<sub>n</sub>=5.5mm로 하였으며 試驗片의 모양 및 치수는 KS B 0851(點熔接이음의 引張剪斷試驗方法)을 참고하여 Fig. 1과 같이 선정하였다. 使用點熔接機의 諸元은 最大容量 75KVA, 220V, 60Hz, 水冷式, 空氣壓 3kgf/cm<sup>2</sup> 型이며 熔接條件은 美國抵抗熔接機製造業者協會(RWMA)가 推薦하고 있는 熔接條件<sup>(10,12)</sup>을 使用하였다.

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions of low carbon steel sheets

$\sigma_t$	$\sigma_y$	$\sigma_u$	$E$	$\epsilon$ (%)	$(H_v)_{100gf}$	C	Mn	Si	P	S
(kgf/mm <sup>2</sup> )										
19.5	22.7	31.8	2.1×10 <sup>4</sup>	30.6	120	0.16	0.46	0.27	0.02	0.02

$\sigma_t$  ; Elastic limit

$\sigma_u$  ; Ultimate tensile strength

$\epsilon$  ; Elongation

$\sigma_y$  ; Yield stress

$E$  ; Elastic modulus

$(H_v)_{100gf}$  ; Micro Vickers hardness on 100gf weight

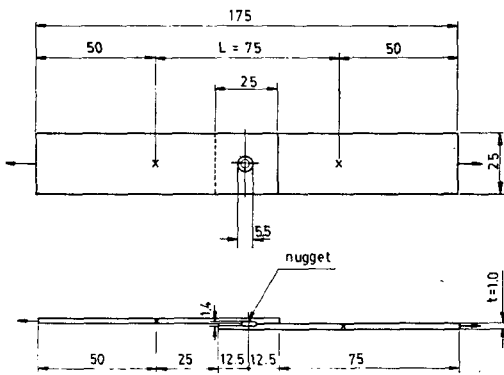
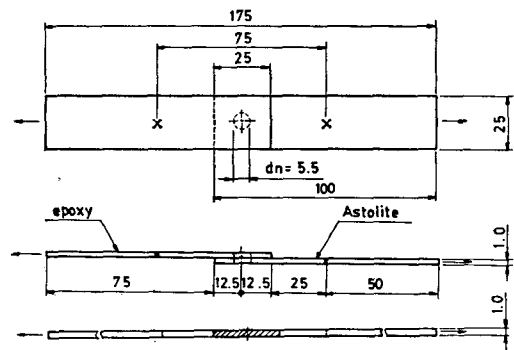


Fig. 1 Shapes and dimensions of specimen by spot welding

한편 너깃周圍에 發生하는 應力分布舉動을 考察하기 위하여, 근사적인 方法으로 光彈性試驗方法을 應用하였다. 但 이때 다음과 같은 假定을 設定하였다. 光彈性試驗片의 物性이 實際 點熔接試驗片과 같도록 너깃內部·熱影響部 및 母材部 등으로 區分하여 對比시킨다는 것은 거의 不可能한 일이므로, 應力解析은 點熔接試驗片을 일단 均質材로 假定한 후 그와 똑같은 모양을 갖는 光彈性 모델試驗片을 製作하여 實驗에 임



(a) Plane specimen

(b) Sectional specimen

Fig. 2 Shapes and dimensions of photoelastic model specimens

했다.

光彈性 모델 實驗을 하기 위한 試驗片의 모양과 치수는 Fig. 2와 같다. 모델 試驗片은 平面試驗片(Fig. 2 a)과 가로 斷面試驗片(Fig. 2 b)으로 나누고 다시 이것을 等色線 및 等傾線測定用試驗片으로 各各 分類하였다.

따라서 光彈性 모델試驗片은 모두 4種類이다. 특히 等色線 測定用 平面試驗片을 製作할 때는 光彈性試驗時에 試驗片의 接合 部分에서 兩板의 서로 다른 等色線 무늬가 重複되는 것을 피하기 위해 한 쪽은 에폭시板(epoxy plate), 다른 쪽은 光彈性 무늬가 나타나지 않는 物質인 아크릴系(Astolite) 板을 使用하였다. 이때 두 板을 接着하는데는 上下板을 겹쳐서 드릴( $\phi 5.5$  mm)로 구멍을 뚫은 후 그 구멍에다 接着劑를 注入시켰다. 接着劑는 에폭시 계통의 것으로서 에폭시樹脂 100g, 無水푸탈酸 硬化劑 30g을 混合하고 이것을 140°C

에서 融解시키면서 액중의 氣泡가 完全히 除去되도록 調質處理하였다.

이와 같은 接着劑를 140°C下에서 드릴링 한 구멍에 注入한 후, 모델試驗片을 應力凍結爐속에 넣어 5°C/時의 速度로 硬化시켜 實驗에 使用하였다. 實驗에 使用된 試驗機로는 10ton 型 萬能引張試驗機 및 光彈性試驗裝置(Riken keiki fine instrument Co., PA-300 type)였다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1. 熔接條件에 따른 強度舉動

點熔接한 材料의 機械的 性質을 左右하는 主要因子로는 兩板사이에 通電되는 電流, 熔接時間, 電極加壓力을 들 수 있다<sup>(1-4)</sup>. 最適熔接條件을 알아내기 위하여

Table 2 Spot welding conditions & weld performances

Symbols of group	Welding conditions			Welds performance				
	Current <i>I</i> (Amp)	Time <i>T</i> ( $\infty$ )	Electrode force <i>F</i> (kgf)	Nugget diameter <i>d<sub>n</sub></i> (mm)	Quality of nugget	Fracture mode	Weld strength <i>P/d<sub>n</sub></i> (kgf/mm)	
A	<i>A</i> <sub>0</sub>	8696	10	260	4.98	u.n, e.i	Shear	44.98
	<i>A</i> <sub>1</sub>			246	5.12	Good	Shear	103.91
	<i>A</i> <sub>2</sub>			240	5.31	Good	Button	108.29
	<i>A</i> <sub>3</sub>			230	5.50	Good	Tear	111.27
	<i>A</i> <sub>4</sub>			220	5.75	Good	Tear	110.96
	<i>A</i> <sub>5</sub>			208	5.96	e.e, de	Tear	109.56
	<i>A</i> <sub>6</sub>			200	6.15	s.f, sp., e.e,	Tear	107.16
B	<i>B</i> <sub>0</sub>	7128	20	190	4.90	u.n, e.i	Shear	35.10
	<i>B</i> <sub>1</sub>			180	5.01	Good	Shear	73.05
	<i>B</i> <sub>2</sub>			167	5.28	Good	Button	99.24
	<i>B</i> <sub>3</sub>			160	5.50	Good	Button	99.82
	<i>B</i> <sub>4</sub>			150	5.83	Good	Tear	99.14
	<i>B</i> <sub>5</sub>			138	6.10	e.e	Tear	98.20
	<i>B</i> <sub>6</sub>			130	6.27	de., e.e	Tear	97.96
C	<i>C</i> <sub>0</sub>	5821	40	120	3.93	u.n	Shear	15.27
	<i>C</i> <sub>1</sub>			110	4.62	u.n	Shear	24.24
	<i>C</i> <sub>2</sub>			100	4.98	u.n	Shear	40.56
	<i>C</i> <sub>3</sub>			93	5.50	Good	Shear	65.64
	<i>C</i> <sub>4</sub>			83	7.06	e.e	Button	65.86
	<i>C</i> <sub>5</sub>			70	7.63	de.	Tear	64.09
	<i>C</i> <sub>6</sub>			60	7.80	sp., o.h, e.e	Tear	63.08

1 $\infty$ =1/60 sec.

sp. : Spatter

e.e : Excessive expulsion

de : Defect

e.i : Excessive indentation

s.f : Surface fusion

u.n : Undersized nugget

o.h : Overheating

이들 因子들을 變化시켜가면서 熔接強度舉動을 조사하였는데 그 結果를 Table 2에 소개한다. Table 2에서 A·B·C 群은 各各 RWMA가 推薦하는 3等級<sup>(10,11)</sup>의 條件이며 Table 中의 A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>..., B<sub>0</sub>, B<sub>1</sub>..., 등은 試驗片의 기호이다.

Table 2를 살펴보면 A 群에서는 A<sub>3</sub> 試驗片의 熔接強度가, B 群에서는 B<sub>3</sub> 試驗片의 熔接強度 그리고 C 群에서는 C<sub>3</sub> 試驗片의 熔接強度가 各各 最大值를 나타낸다. 단, C 條件에서는 C<sub>4</sub> 試驗片의 熔接強度가 C<sub>3</sub> 試驗片의 그것보다 높은 값을 가지고 있으나, 熔接條件과는 달리, 특히 點熔接缺陷을 제한하는 RWMA의 規定<sup>(12)</sup>에 抵觸됨으로 除外시켰다.

Fig. 3은 이러한 實驗結果를 토대로 熔接強度와 電極加壓力의 關係를 나타낸 것이다. 熔接強度는 電極加壓力이 增加할수록 항상 增加하는 것은 아니고 어떤 電極加壓力에서 그것은 最大值를 갖는다.

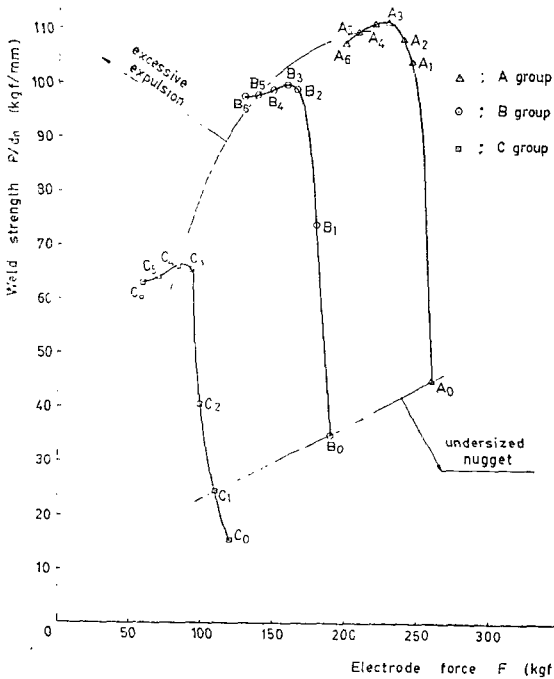


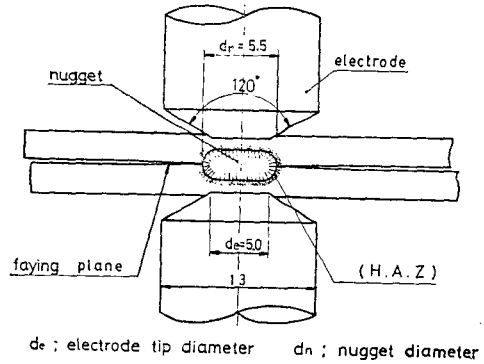
Fig. 3 Effect of electrode force on weld strength

특히 電流가 8696 암페어, 熔接時間 10 싸이클(∞) 그리고 電極加壓力 230kg을 갖는 A 群의 熔接條件中 A<sub>3</sub> 試驗片의 熔接強度가 각 熔接條件들 中 最大值를 나타낸다. 따라서 最大熔接強度를 나타내는 最適熔接條件이 存在함을 알 수 있다. 다음 節에서는 最適熔接條件으로 點熔接된 試驗片의 너깃周圍에 觀察되는 破壞舉動을 소개하겠다.

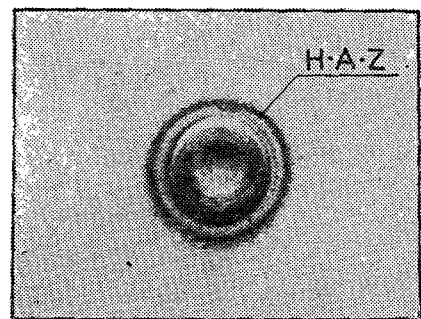
### 3. 2. 最適熔接條件下에서의 破壞舉動

引張荷重下에서 點熔接板材의 破壞舉動을 檢討하기 위하여 最適熔接條件으로 點熔接한 경우의 點熔接部位의 形態를 우선 Fig. 4에 제시한다. Fig. 4의 (a)는 點熔接時의 兩板 사이에 作用하는 電極의 모양과 너깃生成 關係를 나타내고, (b)는 點熔接한 후에 平面上에서 觀察되는 熔接部의 外觀으로서 最外廓의 點은 고리가 熱影響部(HAZ)이다. 이러한 熱影響部는 點熔接當時 900°C~1400°C 정도의 熔接熱影響을 받으며 따라서 金屬組織學的 性質이 變化된 곳이기도하다. (c)는 實際로 너깃을 절단했을 때의 斷面을 나타낸다<sup>(11)</sup>.

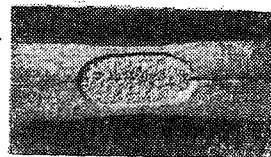
이와 같은 너깃을 갖는 薄板 點熔接 試驗片에 引張荷重을 가했을 때 發生하는 巨視的 破壞形態를 Fig. 5에 제시한다. 이 때에 破壞되는 양상은 우선 너깃端을



(a) Electrode tip shape & estimated nugget



(b) Plane figure of nugget formation



(c) Cross sectional view of nugget periphery

Fig. 4 Features of spot weld mechanism

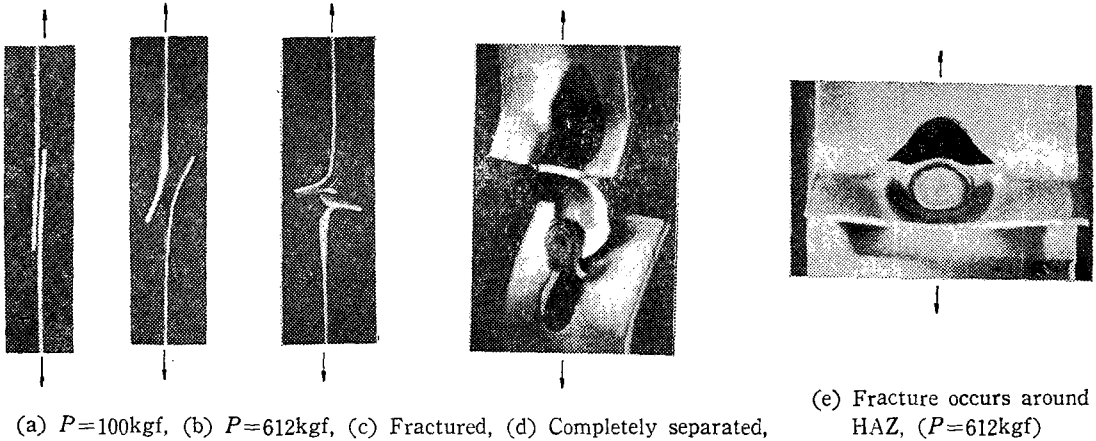


Fig. 5 Characteristic aspect under tensile test process

境界로 너깃바깥 周圍에서 破壞가 일어나는데 破壞는 引張軸 方向을 中心으로 너깃 上下板 中 너깃境界 바깥의 어떤 特定한 局部場所 即  $x/c$ (너깃端으로 부터 임의의 거리/너깃 반지름) $=0.185$  되는 곳에서 軸에 垂直 直角方向으로 發生하고 그 후 그것은 荷重이 增加함에 따라 熱影響部 둘레로 점차 傳播한다. 그래서 결국 試驗片은 最終破斷을 일으키는데 本 實驗의 境遇 熱影響部는,  $x/c=0\sim 0.262$  사이에 있으므로 상술한  $x/c=0.185$ 가 熱影響部 領域임을 알 수 있다. 따라서 이러한 破壞의 發生 및 傳播經路 位置는 너깃境界 바깥 쪽의 熱影響部內에 存在하는 것이 특징이다. 이와 같은 破壞가 너깃境界 바깥部分 중에서도 왜 熱影響部內에 發生·傳播하는가에 대한 이유는 분명치 않다. 이러한 의문점과 관련하여 우선 너깃 周圍의 마이크로 Vickers 硬度分布를 조사하였다.

Fig. 6은 너깃周圍의 마이크로 Vickers 硬度(100gf) 分布를 測定한 結果이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 마이크로 Vickers 硬度値는 母材部, 熱影響部 및 너깃內部

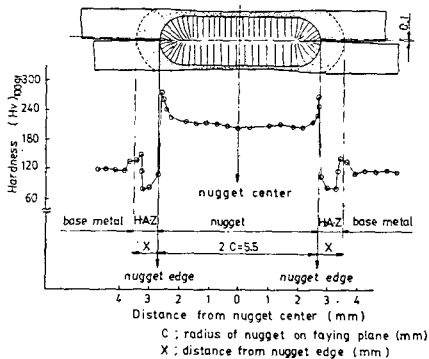


Fig. 6 Micro Vickers hardness surveys along laying plane

에 따라 各各 그 값이 다르다. 即 母材部의 硬度値는 平均 120 정도이고, 熱影響部의 平均硬度値는 110 정도이며 그리고 너깃內部의 平均硬度値는 215정도이다. 특히 熱影響部의 平均硬度를 구성하는 값은 最高値가 150, 最低値가 78 정도로 매우 산발적임을 알 수 있다. 이들 값 중에서 最低値를 나타내는 硬度値 78은 母材가 갖는 硬度値 120 보다도 훨씬 작은 수치이다.

이와 같이 熱影響部에서 觀察되는 硬度分布의 不均衡性中 最低硬度値를 가지는 局部場所(Fig. 6 참조)와 熱影響部에서 發生·傳播하는 破壞 位置를 比較하여 本 結果 거의 일치하고 있음을 알았다. 따라서 이러한 낮은 硬度値를 갖는 組織을 바탕으로 破壞가

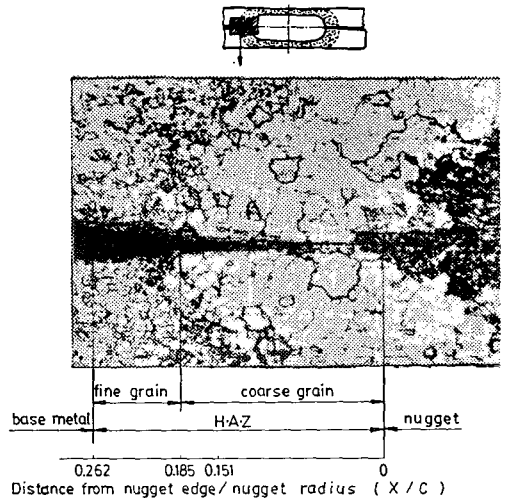


Fig. 7 Micro structure near of nugget boundary recrystallization with grain growth along HAZ, 100×

發生·傳播하고 있을 것이 예상된다.

이와 같은 문제를 상세히 考察하기 위하여 너깃周圍의 熱影響部에 해당하는 金屬組織을 조사한 結果, 이것을 Fig. 7에 제시하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 너깃周圍의 熱影響部에는 粗大한 結晶粒과 微細한 結晶粒으로 구성되어 있으며, 이 境遇 粗大結晶粒의

마이크로 Vickers 硬度値는 78~120 정도로 낮고, 微細結晶의 그것은 120~150 정도로, 그 값은 粗大結晶粒의 그것에 비하여 높은 값을 갖는다. 따라서 破壞는 이러한 不均衡組織境界部에 가까운 粗粒部에서 發生하고 그 후 應力의 增加와 더불어 破壞는 熱影響部 둘레를 따라서 傳播한다고 생각된다.

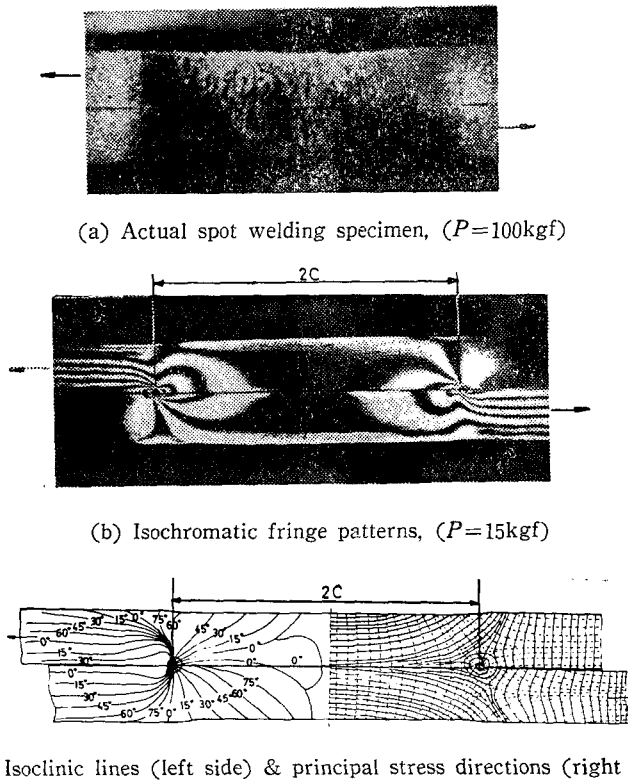
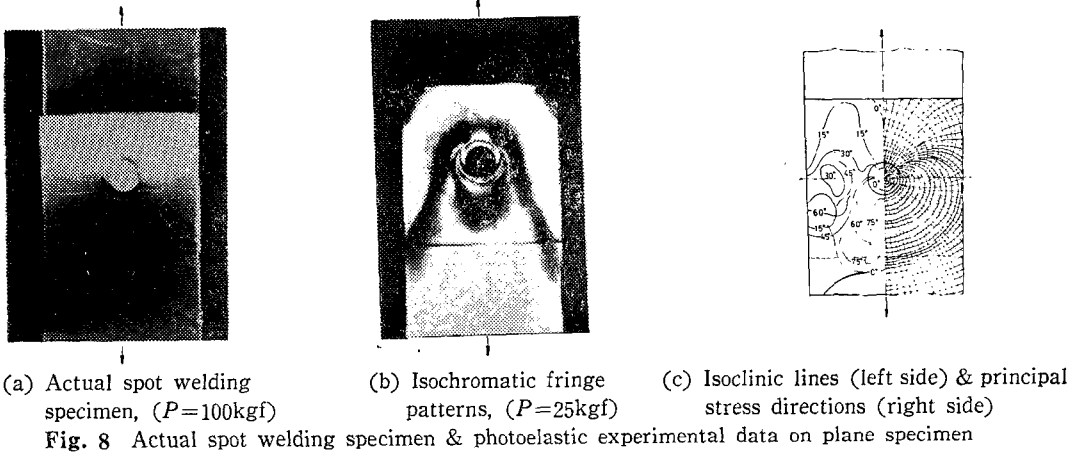


Fig. 9 Actual spot welding specimen & photoelastic experimental data on sectional specimen

3.3 光彈性 모델 實驗結果에 대한 너깃周圍의 應力分布變動

本節에서는 너깃周圍에서 發生·傳播하는 破壞와 밀접한 關係가 있을 것이라고 예상되는 應力分布變動을 2次元 光彈性 모델 實驗結果를 토대로하여 考察하려고 한다.

Fig. 8의 (a)는 實際 點熔接된 試驗片이 引張荷重을 받게 되었을 때 變形된 形態의 平面모양이며 (b)는 等色線 무늬를 나타내고, (c)는 中心線에서부터 왼쪽 것은 等傾線무늬, 오른쪽 것은 왼쪽 等傾線으로부터 구한 主應力線을 표시한다. 한편 Fig. 9는 點熔接試驗片의 가로斷面과 光彈性試驗結果를 나타내며 Fig. 9 (a)는 點熔接試驗片의 가로斷面모양, Fig. 9 (b)는 等色線 무늬, Fig. 9 (c)는 等傾線무늬 및 主應力線을 나타낸다. Fig. 8 및 Fig. 9의 資料들로부터 算出한 荷重作用方向應力  $\sigma_x$  값을 Fig. 10(平面試片의 境遇) 및 Fig. 11(가로斷面試片의 境遇)에 表示하였다.

Fig. 10은 너깃중심점으로부터  $x=2.7\text{mm}$  떨어진

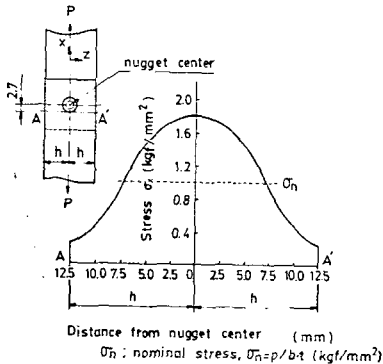


Fig. 10 Axial stress ( $\sigma_x$ ) distribution on lateral section A-A' at 2.7mm distance from nugget center line of plane specimen

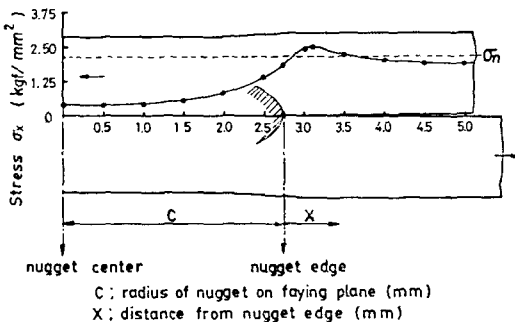


Fig. 11 Axial stress ( $\sigma_x$ ) distribution at faying plane on sectional specimen

A-A' 線上的  $\sigma_x$  값을 나타내고 있으며, 이때의  $\sigma_{x\max}$  은 公稱應力  $\sigma_n$  값( $\sigma_n=P/b \cdot t=1.0\text{kgf/mm}^2$ )의 1.81 倍로서 板幅 中心部에 位置하고 있다. 이 結果는 平塚一富<sup>(8)</sup> Yih-Renn Kan<sup>(9)</sup> 및 青山等<sup>(13)</sup>의 研究結果와 같은 경향을 나타낸다. Fig. 11은 너깃中心을 포함한 너깃周圍의 應力分布를 거리에 따라 計算·整理한 것인데  $\sigma_{x\max}$ 의 값  $2.50\text{kgf/mm}^2$ 은 公稱應力  $\sigma_n$  값( $P/b \cdot t=2.14\text{kgf/mm}^2$ )의 1.17 倍로서, 그것은 너깃境界로부터  $x/c$ (너깃端으로부터 임의거리/너깃 반지름)=0.151인 곳에 作用하고 있다. 이 값(位置)은 熱影響部の 領域內에 속한다. 따라서 이 結果는 너깃端 自體가 最大應力이 發生하는 곳이 아니고 너깃境界로부터 약간 떨어진 局部場所 即 熱影響部內에 해당되는 어떤 局部場所에 最大應力이 있음을 뜻한다.

이상의 結果를 종합해 보면  $\sigma_{x\max}$ 이 作用하는 位置는, 板幅中心部の 너깃境界 바깥 部分인 點熔接熱影響部內에 있음은 알았고 破壞는 이곳에서 發生·傳播한다는 것을 확인했다.

4. 結 論

本 研究에서 얻어진 結論을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 最大熔接強度를 나타내는 最適點熔接條件이 存在하고, 이러한 最適條件下에서 熔接된 試驗片의 破壞는 너깃端을 境界로 너깃 바깥에서 일어난다.
- (2) 光彈性 모델實驗結果 最大應力은 板幅中心線에 存在하되 點熔接熱影響部에 해당하는 場所에서 일어난다.
- (3) 點熔接熱影響部는 硬度值가 낮은 粗大結晶粒과 硬度值가 높은 微細結晶粒으로 構成되어 있으며 이러한 不均衡組織中 粗粒部가 脆弱場所가 되고, 破壞는 이곳에서 發生·傳播한다.

後 記

本 研究를 수행하는데 있어서, 光彈性材料 및 實驗裝置를 제공해 주신 嶺南大學校 崔善浩 教授님, 그리고 試驗片을 點熔接 해 주신 大宇自動車(株) 李憲元 課長님께 感謝 드리는 바입니다.

參 考 文 獻

- (1) M.L. Begeman, M.L. Hipple, L. Cullum, Jr., Spot Welding Galvanized Steel, Weld J., 28, p.

- 389—S, Sep., 1949.
- (2) John F. Rudy, Roy B. McCauley, Roberts, Green, The Behavior of Spot Welds Under Stress, Weld. J., 35, pp. 65—S~71—S, Feb., 1956
- (3) Pollard, Spot Welding Characteristics of HSLA Steel for Automotive Applications, Weld. J., 53, p. 350—S, Aug., 1974
- (4) Zschokke H., Montanden, Statische Prüfung und Berechnung von Punktschweissverbindungen bei Scherzugbeanspruchung, Brown Boveri Mitteilungen, pp. 318~335, Aug., 1950
- (5) 田沼欣司, 橋本達哉, 二, 三の冷間壓延鋼板のスポット溶接継手の比較について, 日本溶接學會誌, 47卷2號, pp. 109~114, 1978
- (6) Ernest F. Nippes, Robert F. Underhill, Spot Welding of Heavy-Gage Structural Steel, Weld. J., 28, pp. 507—S~520—S, 1949
- (7) R.S. Chandel, S. Garber, Mechanical and Metallurgical Aspect of Spot Welded Joints in Heat Treated Low Carbon Mild Steel Sheet, Metals Technology, p. 419, Sep., 1974
- (8) 平塚一富, 耐候性鋼の點溶接部の性質ニついて, 日本溶接學會誌, 40卷1號, pp. 13~24, 1971
- (9) Yih-Renn Kan, Fatigue Resistance of Spot-Welds, An Analytical Study, Metals Engineering Quarterly, pp. 26~36, Nov., 1976.
- (10) E.J. Del Vecchio, Resistance Welding Manual Vol. 1, 3rd. ed., p.125, RWMA, Philadelphia, 1956.
- (11) 宋森弘, 金富東, 點溶接의 너깃지름과 板間接觸 지름의 關聯性, 大韓機械學會論文集, 7卷3號, p. 316, 1983
- (12) 中村 孝, 浜崎正信, 點溶接におけるナゲット生成機構の研究(第7報), 日本溶接學會誌 41卷11號, p. 81, 1972
- (13) 青山威恒, 藤本正男, 引張せん断荷重を受ける1點スポット溶接重ね継手の應力分布, 材料, 22卷237號, pp. 55~56, 1973